

УДК 621.791.92

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2022.2\(489\).3](https://doi.org/10.15589/znp2022.2(489).3)**LASER CLADDING UTILIZING A HANDHELD TOOL
USING SEMI-AUTOMATIC CLADDING MODES****ЛАЗЕРНЕ НАПЛАВЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ РУЧНОГО
ІНСТРУМЕНТУ В НАПІВАВТОМАТИЧНОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ****Artemii V. Bernatskyi¹**

bernatskyi@paton.kiev.ua

ORCID: 0000-0002-8050-5580

Mykola V. Sokolovskyi¹

m_sokolovskyi@paton.kiev.ua

ORCID: 0000-0003-3243-5060

Oleksandr V. Siora¹

siora_ov@ukr.net

ORCID: 0000-0003-1927-790X

Volodymyr A. Lukashenko¹

z_lyk@ukr.net

ORCID: 0000-0002-9685-4654

Nataliia O. Shamsutdinova¹

shamsutaliia@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3525-0080

Oleksandr O. Danyleiko^{1,2}

danyleiko.oleksandr@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8501-0421

Valentyna I. Bondarieva¹

laser-77@online.ua

ORCID: 0000-0002-4745-0995

А. В. Бернацький¹

канд. техн. наук, старший дослідник, завідувач відділу

М. В. Соколовський¹

аспірант, інженер-технолог І категорії

О. В. Сіора¹

науковий співробітник

В. А. Лукашенко¹

канд. техн. наук, науковий співробітник

Н. О. Шамсутдінова¹

інженер

О. О. Данилейко^{1,2}

інженер-технолог І категорії

В. І. Бондарєва¹

заступник завідувача відділу

¹*E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*¹*Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України, м. Київ*²*E.O. Paton Educational and Research Institute of Material Science and Welding,**National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv*²*Навчально-науковий інститут матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ*

Abstract. In this study, certain technological features of semi-automatic laser cladding using a manual laser tool were investigated.

Purpose. The purpose of this study was to highlight the technological features of manual semi-automatic laser cladding, related to obtaining a flat uniform surface, as well as highlighting the features of various laser surfacing processes, coupled with their comparison on experimental basis.

Method. A series of experimental laser cladding operations was carried out on samples. Micro- and macro-sections of the samples were prepared, on which structural and fractographic analyzes were carried out.

Results. Conducted study has shown that obtaining a smooth cladding surface during cladding with a manual laser tool in semi-automatic mode is possible when one is overlapped by another by 30-50% of its width. The comparison between the powder-fed laser cladding and the wire-fed semi-automatic laser cladding has established that due to the low heat capacity of the particles of surfacing powder and poor thermal contact between them, a much smaller proportion of energy must be spent on their melting than on the melting of a monolithic section of the filler wire with a diameter significantly larger than the diameter of the powder particles. For these and other reasons, laser cladding with a wire is a more energy-intensive process compared to laser powder cladding.

Scientific novelty. The obtained results allow us to lay a base for optimization of the semi-automatic laser cladding modes for laser cladding processes utilizing a handheld tool, as well as allowing us to choose a more technologically fitting type of the process for further development of new manual laser cladding tool designs.

Practical importance. The presented research results will help in the implementation of laser surfacing technology at enterprises of various industries, where tasks related to laser surfacing on thin sheet metals (carbon steels, aluminum, titanium and magnesium alloys), which are necessary in the manufacturing of single products, small batches of parts or when working with complex surfaces, exist.

Key words: laser cladding, handheld tool, semi-automatic cladding, defects, powder cladding, wire cladding.

Анотація. В даній роботі було досліджено певні технологічні особливості наплавлення ручним лазерним інструментом в напівавтоматичному режимі роботи.

Мета. Метою дослідження даної роботи було висвітлення технологічних особливостей ручного лазерного наплавлення, що пов'язане з отриманням рівної наплавленої поверхні, а також висвітлення особливостей різних процесів лазерного наплавлення та їх експериментальне порівняння.

Методика. Проведено серію експериментальних напавлень на зразки. Знято мікро- та макро-шліфи, проведення структурний та фрактографічний аналізи.

Результати. Дослідження показали, що одержання рівної наплавленої поверхні при напавленні ручним лазерним інструментом в напівавтоматичному режимі досягається тоді, коли один валик перекривається другим на величину в 30-50% його ширини. Порівняння процесів порошкового напавлення з напавленням присаджувальним дротом ручним лазерним інструментом встановило, що за рахунок малої теплоємності часток наплавочного порошку й поганого теплового контакту між ними, на їхнє плавлення потрібно затратити значно меншу частку енергії, ніж на плавлення монолітної ділянки присаджувального дроту з діаметром значно більшим, ніж діаметр порошкових часток. Через ці та інші причини, лазерне напавлення дротом є більш енергоємним процесом у порівнянні з лазерним порошковим напавленням.

Наукова новизна. Отримані результати дають змогу закласти базу для оптимізації режимів обробки напівавтоматичних режимів роботи лазерного напавлення з використанням ручного лазерного інструменту, а також обрати більш технологічно відповідний вид обробки для подальшого конструювання нових ручних інструментів, призначених для лазерного напавлення.

Практична значимість. Проведені результати дослідження допоможуть у впровадженні технології лазерної напавлення на підприємствах різних галузей, де існують задачі пов'язані із напавленням на тонколистові метали (вуглецевих сталей, алюмінієвих, титанових і магнієвих сплавів), необхідні при виготовленні одиничних виробів, дрібних партій деталей або проведенні робіт у важкодоступних місцях.

Ключові слова: лазерне напавлення, ручний інструмент, напівавтоматичне напавлення, дефекти, порошкове напавлення, напавлення дротом.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Лазерне напавлення – це процес напавлення, який використовує потужний лазерний промінь для розплавлення матеріалу покриття та тонкого шару підкладки з ціллю утворення покриття товщиною від 50 нм до 2 мм без пор і тріщин, із низьким розрідженням, яке б при цьому щільно з'єднувалося з матеріалом підкладки [1]. Цей процес можна використовувати для охоплення великої території шляхом накладення окремих доріжок, але він унікальний для захисту менших, локалізованих областей.

Матеріал покриття, як правило, використовується у порошковій формі, який можна попередньо нанести на оброблювану підкладку або ввести в резервуар розплаву через систему подачі. Лазерне напавлення попередньо нанесеним порошком знайшло досить обмежене застосування, оскільки така технологія нанесення порошку займає багато часу. При цьому необхідно додати, що провести попереднє нанесення порошку на об'єкти складної форми вкрай важко.

Навпаки, лазерне напавлення з внесенням порошку шляхом його безпосередньої подачі під час обробки широко використовується [1-2]. Він забезпечує більш керуєний процес обробки з вищою енергоефективністю і кращою відтворюваністю, ніж конкуруючі процеси, дозволяючи наносити широкий спектр матеріалів на майже будь-яку підкладку, а також легко контролювати адгезію, розрідження та товщину нанесеного покриття.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

В останні роки, завдяки розробці високопотужних лазерів, було вдосконалено механізми управління та доставки лазерного випромінювання у зону обробки завдяки використанню волокон. Також велику увагу привернули до дослідження можливостей різних технологій лазерної поверхневої обробки. Дослідники проаналізували різні фактори цього процесу для покращення продуктивності процесу. Експериментальні та теоретичні дослідження [3-4] показують, що ефективність методів лазерного

наплавлення та поверхневого легування можна значно підвищити шляхом правильного вибору вхідних параметрів процесу.

Наприклад, у роботі de Oliveira та ін. [5] було проведено теоретичне та експериментальне дослідження коаксіального лазерного наплавлення нікелевого порошку на сталеву підкладку виявило кілька специфічних особливостей, які відрізняють коаксіальне наплавлення від традиційної установки бічного накладення; а робота Tamanna та ін. [6] переглянули хід чисельного моделювання, що охоплює три окремі стадії процесу, щоб змодельовати динаміку потоку порошку, пул розплаву та властивості покриття. Для кожного етапу були обговорені керівні рівняння, вплив змінних процесу та методи експериментальної перевірки.

При використанні ручного лазерного інструменту на сьогоднішній день намітились тенденції застосування його у стаціонарному та напівавтоматичному режимах. [7] При виконанні експериментів у напівавтоматичному режимі оператор здійснює вручну переміщення лазерної головки відносно оброблюваної поверхні. При цьому всі параметри технологічного процесу встановлюються системою управління. Стаціонарний режим передбачає ведення процесу зварювання та наплавлення при нерухомій системі генерації лазерного випромінювання. Переміщення оброблюваних деталей під час цього процесу оператор здійснює вручну.

Технології лазерної обробки матеріалів в цілому, а точніше лазерного наплавлення, постійно розвиваються. Особливою сферою поточних досягнень є ручні лазерні інструменти, які дозволяють, наприклад, відновити незначні сліди стирання на формувальних або ріжучих інструментах шляхом нанесення потрібної кількості матеріалу на поверхню [8,9]. Системи можуть бути саморегульованими, щоб компенсувати непостійний рух під час ручного керування. Численні дослідження [8-10] в галузі лазерної технології свідчать про постійний розвиток технологій лазерного зварювання та наплавлення. Так, створення ручних лазерних пристроїв для виконання різних завдань здаються одним з перспективних напрямків для виконання цілого пласту малосерійних та експериментальних робіт [10]. Однак, відносно висока вартість лазерного обладнання обмежує кількість застосувань даної технології у виробництві через, наприклад, невеликі обсяги робіт, що потребують мінімальної додаткової обробки та/або використання спеціальних матеріалів, які виключають наплавлення конструкційних елементів (бобишок, функціональних площадок тощо) за допомогою традиційних методів [8].

Останнім часом з'явилося багато публікацій, в яких наведені приклади створення лазерних комплексів та ручного лазерного інструменту [11]. Задачі, які можуть вирішуватися силами такого комплексу

відносяться до відновлення деталей транспорту та обладнання, зварювання виробів з тонких сталевих листів, а також деревообробних робіт на підприємствах дрібного та середнього бізнесу. Часто у цих комплексах використовують потужні діодні лазери, оскільки їх ККД становить до 48...52%. Відмітимо, що для підвищення гнучкості транспортування випромінювання його доцільно передавати по оптичному волокну. Такий технічний прийом можна застосувати як для Nd:YAG-лазера (довжина хвилі випромінювання $\lambda=1,06$ мкм), так і для діодного лазера ($\lambda=0,808/0,940$ мкм). Для підвищення терміну експлуатації Nd:YAG-лазера його накачку здійснюють не лампами, а діодами. В цьому плані діодний лазер кращий, бо його випромінювання використовується безпосередньо, а не через перетворювач, в ролі якого виступає кристал алюмо-ітрієвого гранату, легованого неодимом.

Лазерне наплавлення знайшло відносно широке застосування для захисту матеріалів від зносу, корозії та окислення, для нанесення самозмащувальних покриттів і теплових бар'єрів, а також для відновлення дорогих промислових компонентів. Найперспективнішими галузями для впровадження ручного лазерного інструменту є такі галузі машинобудування, як:

- автомобілебудування;
- літакобудування;
- вагонобудування;
- суднобудування.

На підприємствах цих галузей існують задачі пов'язані із наплавленням на тонколистові метали (вуглецеві сталі, алюмінієві, титанові і магнієві сплави), які необхідні при виготовленні одиничних виробів, дрібних партій деталей або проведенні робіт у важкодоступних місцях. В тому числі серед можливих застосувань ручного лазерного інструменту великого поширення набула лазерна поверхнева обробка, яка використовують при очищенні штампів та форм для лиття від органічних сполук у різних галузях промисловості; при відновленні зовнішнього вигляду пам'ятників меморіальних дощок тощо; а також для зачищення зварних швів та різних поверхонь перед фарбуванням.

Наприклад, на виробництві Mobil Laser Tec (Німеччина) широко використовують ручний лазерний інструмент, підключений до Nd:YAG-лазера фірми „Trumpf” потужністю 1,5 кВт для наплавлення валів та відновлення штампного устаткування з додаванням присаджувального дроту вручну, з використанням системи відео спостереження за процесом (рис. 1).

МЕТА РОБОТИ

Мета роботи – дослідження технологічних особливостей наплавлення ручним лазерним інструментом в напівавтоматичному режимі роботи, а саме:



Рис. 1. Процес ручного лазерного наплавлення для відновлення штампів в промислових умовах з додаванням присаджувального дроту вручну та з використанням системи відео спостереження за процесом [7]



Рис. 2. Наплавлення ручним лазерним інструментом в напівавтоматичному режимі з присаджувальним матеріалом у вигляді порошку

1. Технологічні особливості, що відповідають за отримання рівного наплавленого покриття.

2. Порівняння процесів дрового та порошкового лазерного наплавлення.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Наплавлення ручним лазерним інструментом в напівавтоматичному режимі було проведене з використанням Nd:YAG-лазеру DY-044 виробництва фірми «Rofin-Sinar» (Німеччина) потужністю у 4,4 кВт (довжина хвилі лазерного випромінювання $\lambda=1,06$ мкм). Для наплавлення використовували порошок сплаву, що сам офлюсується ПГ-АН9 (хімічний склад наведено у Таблиці 1), а також дріт Св08Г2С діаметром $\varnothing=0,8$ мм.

Процес лазерного порошкового наплавлення ручним лазерним інструментом в напівавтоматичному режимі наведено на рис. 2.

Експерименти проводилися за наступною методикою.

1. Попередня підготовка деталі і виробів для наплавлення.

2. Встановлення технологічної послідовності накладення наплавочних валиків і режим наплавлення.

3. У подаючі механізми було запроваджено електродний дріт чи порошок.

4. Встановлення співвідношення потужність/швидкість на системі управління в залежності від виду оброблюваного та присаджувальних матеріалів та інших факторів.

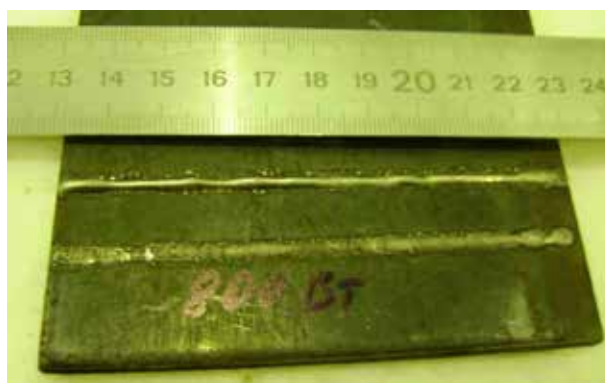


Рис. 3. Зовнішній вигляд валиків, наплавлених ручним лазерним інструментом в напівавтоматичному режимі

5. Подача сигналу на заслінку лазера за допомогою системи управління.

6. Виконання переміщення лазерного інструменту відносно оброблюваної поверхні вручну.

7. Контроль процесу наплавлення і якості отриманих наплавочних валиків.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Структури отриманих наплавлених поверхонь показані на рис. 4. Для їхнього виявлення зі зразків вирізали зразки величиною у 20×20×20 мм, що були

Таблиця 1. Хімічний склад та характеристики порошку, використаного в роботі для отримання наплавлених шарів

Марка, ТУ	Хімічний склад, масовий відсоток							d, мкм	HRC, од. тверд.
	Ni	Cr	B	Si	C	Fe	інші		
ПГ-АН9, ТУ ІЕЗ 374-83	-"-	6,0-10,0	2,8-3,5	1,5-3,5	0,5-1,2	≤3,0	P 0,2-0,9 Cu 2-9	60-150 50-250	48-57

затиснуті в оправку. З даних зразків було виготовлено макро- і мікрошліфи. Мікрошліфи було протравлено хімічним способом у 4%-му спиртовому розчині азотної кислоти (у випадку наплавлення дротом) і електролітичним способом у 20%-му водяному розчині сірчанокислого амонію (у випадку порошкового наплавлення). Мікроструктури досліджували на мікроскопі «Neophot 32», твердість була виміряна на твердомірі М-400 «Лесо» при навантаженнях у 10 та 50 г.

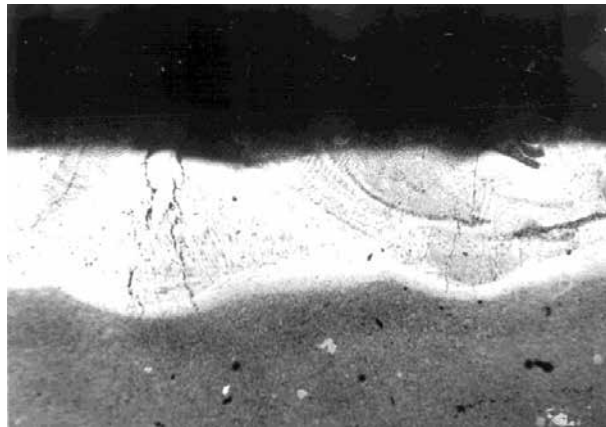
Далі наведено результати лазерного наплавлення порошком ПГ-АН9 на зразки зі сталі 40Х. Наплавлення велося як в один, так й у кілька проходів. Мікроструктура наплавлення зразків № 1 й № 2 представлена на рис. 4(а) і рис. 4(б), відповідно. З малюнків видно, що лінія сплавлення зразка № 2 носить періодичний хвилеподібний характер, тобто наплавлення виконувалося з меншим перекриттям валиків, чим у зразку № 1. Дослідження показали, що в наплавлених шарах спостерігаються окремі мікропори й мікротріщини (рис. 4, а). Товщина перехідного шару в обох зразках однакова й становить 0,032 мм. Зона сплавлення наплавленого шару зі сталлю 40Х щільна, без дефектів і несплавлень. Мікроструктура металу наплавлення дендритна, мілкодисперсна.

Мікротвердість металу наплавлення становить $HV_{0,05} = 530...650$ при мікротвердості основного металу $HV_{0,05} = 248$. Метал основи перебував у нормалізованому стані.

За даними фазового рентгеноструктурного аналізу, при наплавленні порошку ПГ-АН9 на зразок зі сталі 40Х фазовий склад наплавленого шару являє собою матрицю із твердого розчину на основі нікелю з виділенням твердої фази у вигляді боридів Cr й Ni_3B і карбоборидів $Fe_{2-3}(C,B)_6$. Тріщини (див. рис. 4,а) проходять у місцях виділення твердої фази й, по даним фрактографічного аналізу, носять квазі-транскристалічний характер.

Далі наведено результати лазерного наплавлення дротом Св-08Г2С (рис. 5). Структура наплавлення мілкодисперсна, спрямована, складається з бейніту ($HV_{0,05} = 321...303$ МПа), фериту ($HV_{0,05} = 167$ МПа) і перліту ($HV_{0,05} = 187$ МПа). У ЗТВ не розрізняються ділянки. Структура зони ферито-перлітна (бал 8...9) з перевагою перлітної складової, ширина зони 0,126 мм. Основний метал має ферито-перлітну структуру з перевагою феритної складової (бал 9), твердість $HV_{0,05} = 132...147$ МПа. У центрі зразка в структурі основного металу переважає перліт, ймовірно, це пов'язано з прокатом листової заготовки.

В умовах проведення описаного експерименту порошковий метод також є більш кращим у плані термічної локальності, мінімізації ЗТВ і перехідної зони. Можна підібрати режими обробки, при яких якості лазерного наплавлення із присадкою дроту не буде відрізнятися від якості порошкового процесу, однак таке завдання нами не розглядалося.



а)



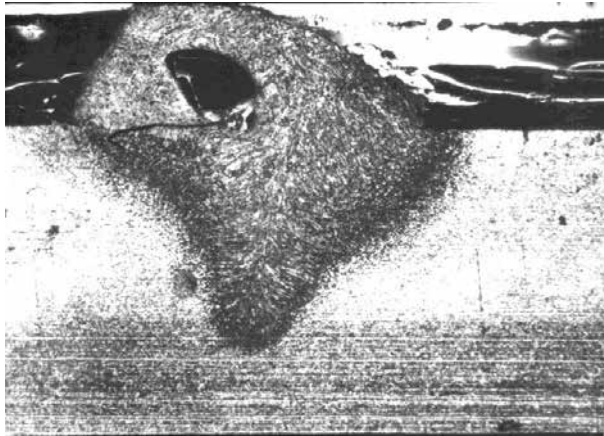
б)

Рис. 4. Структури лазерного порошкового наплавлення сталі 40Х сплавом ПГ-АН9 з характерними дефектами – мікротріщинами (а) та без дефектів (б). Масштаб М80:1.

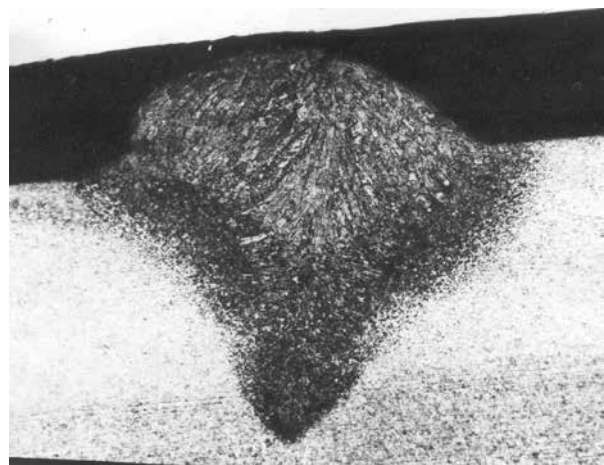
ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Дослідження показали, що одержання рівної наплавленої поверхні при наплавленні ручним лазерним інструментом в напівавтоматичному режимі, досягається коли один валик перекривається другим на величину 30-50% від його ширини. Для наплавлення більш широких валиків нами застосовувалися поперечні коливальні рухи інструментом. Накладання валиків велося зліва направо або на себе. В цих випадках оператор чітко бачить місце лазерного нагріву, його розміри, й сам процес формування валика.

Було розглянуто ведення двох наплавочних процесів з однаковими швидкостями при однаковій потужності лазерного випромінювання. Дослідження термічного впливу на основний метал показали, що у випадку лазерного наплавлення дротом висота доріжок становила 0,5...0,8 мм при глибині ЗТВ 1,85 мм. У випадку порошкового лазерного напла-



а)



б)

Рис. 5. Структури доріжок лазерного наплавлення з присаджувальним дротом: доріжка з характерним дефектом – порою (а) и бездефектна доріжка (б)

лення валиків аналогічної висоти, ЗТВ становить не більше 0,5 мм. Перемішування наплавленого металу з основним було максимальним у випадку використання дроту.

Якщо оцінювати якість наплавлених шарів, то слід зазначити, що найбільш характерним дефектом порошкового лазерного наплавлення є волосяні

мікротріщини (розкриття 7...15 мкм). Найбільш простий спосіб їхнього усунення – зниження твердості наплавленого металу до HRC 35...43. Для наплавлення дротом характерним дефектом є пороутворення. Найбільш надійним способом його усунення є підвищення потужності лазерного випромінювання.

Взагалі, порівнюючи порошкове наплавлення з наплавленням присаджувальним дротом, необхідно відзначити наступне. За рахунок малої теплоємності часток наплавочного порошку й поганого теплового контакту між ними, на їхнє плавлення потрібно затратити значно меншу частку енергії, ніж на плавлення монолітної ділянки присаджувального дроту з діаметром значно більшим, ніж діаметр порошкових часток. Крім того, мають місце витрати потужності на тепловідвід у присаджувальний дріт. Тому процес лазерного наплавлення дротом більш енергоємний у порівнянні з лазерним порошковим наплавленням. Цим пояснюється також більша зона термічного впливу у випадку лазерного дротового наплавлення, у порівнянні з порошковим наплавленням.

ВИСНОВКИ

1. Дослідження по лазерному наплавленню ручним інструментом в напівавтоматичному режимі показали, що одержання рівної наплавленої поверхні, досягається коли один валик перекривається другим на величину 30-50% його ширини. Для наплавлення більш широких валиків необхідно застосовувати поперечні коливальні рухи інструментом.

2. Порівняння процесів порошкового наплавлення з наплавленням присаджувальним дротом ручним лазерним інструментом, дозволило встановити, що за рахунок малої теплоємності часток наплавочного порошку й поганого теплового контакту між ними, на їхнє плавлення потрібно затратити значно меншу частку енергії, ніж на плавлення монолітної ділянки присаджувального дроту з діаметром значно більшим, ніж діаметр порошкових часток. Крім того, мають місце витрати потужності на тепловідвід у присаджувальний дріт. Тому лазерне наплавлення дротом більш енергоємний процес у порівнянні з лазерним порошковим наплавленням. Цим пояснюється також більша зона термічного впливу у випадку лазерного дротового наплавлення, у порівнянні з порошковим наплавленням.

REFERENCES

- [1] Vilar, R. (1999). Laser cladding. *Journal Of Laser Applications*, 11(2), 64-79. <https://doi.org/10.2351/1.521888>
- [2] Vilar, R. (2003). Laser cladding. In *SPIE 5147, ALT'02 International Conference on Advanced Laser Technologies*. Retrieved 24 July 2022, from <https://doi.org/10.1117/12.543724>
- [3] Zhu, L., Xue, P., Lan, Q., Meng, G., Ren, Y., & Yang, Z. et al. (2021). Recent research and development status of laser cladding: A review. *Optics & Laser Technology*, 138, 106915. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.106915>
- [4] Siddiqui, A., & Dubey, A. (2021). Recent trends in laser cladding and surface alloying. *Optics & Laser Technology*, 134, 106619. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106619>

- [5] de Oliveira, U., Ocelík, V., & De Hosson, J. (2005). Analysis of coaxial laser cladding processing conditions. *Surface And Coatings Technology*, 197(2-3), 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.06.029>
- [6] Tamanna, N., Crouch, R., & Naher, S. (2019). Progress in numerical simulation of the laser cladding process. *Optics And Lasers In Engineering*, 122, 151-163. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.05.026>
- [7] Weber, P. (2005). *Mobile Laser im Werkzeug- und Formenbau*. Lasermarkt, Berlin.
- [8] Torims, T. (2013). The Application of Laser Cladding to Mechanical Component Repair, Renovation and Regeneration. DAAAM International Scientific Book 2013, 587-608. <https://doi.org/10.2507/daaam.scibook.2013.32>
- [9] Bach, F. W., Möhwald, K., Laarmann, A., & Wenz, T. (2006). *Modern Surface Technology*. Wiley.
- [10] Steen, W. M., Mazumder, J., & Watkins, K. G. (2010). *Laser Material Processing* (4th ed. 2010 ed.). Springer.
- [11] Puester, T., Walter, J., Hustedt, M., & Wesling, V. (2012). Technical safety measures for the safe use of hand-held laser processing devices. *Journal of Laser Applications*, 24(5), 052004. <https://doi.org/10.2351/1.4742798>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Vilar, R. (1999). Laser cladding. *Journal Of Laser Applications*, 11(2), 64-79. <https://doi.org/10.2351/1.521888>
- [2] Vilar, R. (2003). Laser cladding. In *SPIE 5147, ALT'02 International Conference on Advanced Laser Technologies*. Retrieved 24 July 2022, from <https://doi.org/10.1117/12.543724>
- [3] Zhu, L., Xue, P., Lan, Q., Meng, G., Ren, Y., & Yang, Z. et al. (2021). Recent research and development status of laser cladding: A review. *Optics & Laser Technology*, 138, 106915. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.106915>
- [4] Siddiqui, A., & Dubey, A. (2021). Recent trends in laser cladding and surface alloying. *Optics & Laser Technology*, 134, 106619. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106619>
- [5] de Oliveira, U., Ocelík, V., & De Hosson, J. (2005). Analysis of coaxial laser cladding processing conditions. *Surface And Coatings Technology*, 197(2-3), 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.06.029>
- [6] Tamanna, N., Crouch, R., & Naher, S. (2019). Progress in numerical simulation of the laser cladding process. *Optics And Lasers In Engineering*, 122, 151-163. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2019.05.026>
- [7] Weber, P. (2005). *Mobile Laser im Werkzeug- und Formenbau*. Lasermarkt, Berlin.
- [8] Torims, T. (2013). The Application of Laser Cladding to Mechanical Component Repair, Renovation and Regeneration. DAAAM International Scientific Book 2013, 587-608. <https://doi.org/10.2507/daaam.scibook.2013.32>
- [9] Bach, F. W., Möhwald, K., Laarmann, A., & Wenz, T. (2006). *Modern Surface Technology*. Wiley.
- [10] Steen, W. M., Mazumder, J., & Watkins, K. G. (2010). *Laser Material Processing* (4th ed. 2010 ed.). Springer.
- [11] Puester, T., Walter, J., Hustedt, M., & Wesling, V. (2012). Technical safety measures for the safe use of hand-held laser processing devices. *Journal of Laser Applications*, 24(5), 052004. <https://doi.org/10.2351/1.4742798>

© А. В. Бернацький, М. В. Соколовський, О. В. Сіора, В. А. Лукашенко,
Н. О. Шамсутдінова, О. О. Данилейко, В. І. Бондарєва
Дата надходження статті до редакції: 14.07.2022
Дата затвердження статті до друку: 28.07.2022